

**INAUGURAL - DISSERTATION**  
**zur**  
**Erlangung der Doktorwürde**  
**der**  
**Naturwissenschaftlich - Mathematischen**  
**Gesamtfakultät**  
**der Ruprecht - Karls - Universität**  
**Heidelberg**

**vorgelegt von**  
**Dipl.-Phys. Christian Müller**  
**aus Castrop-Rauxel**

**Tag der mündl. Prüfung: 6. November 2002**



# **Rasterkraftmikroskopie an Einkristallen von Lithium- und Kalziumfluorid nach Bestrahlung mit Schwerionen**

**Gutachter:**

**Prof. Dr. Reinhard Neumann**

**Prof. Dr. Gerhard K. Wolf**



## **Rasterkraftmikroskopie an Einkristallen von Lithium- und Kalziumfluorid nach Bestrahlung mit Schwerionen**

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit schwerioneninduzierten Veränderungen an der Oberfläche ionischer Kristalle. Als geeignete Modellsysteme wurden zu diesem Zweck LiF- und CaF<sub>2</sub>-Einkristalle mittels Rasterkraftmikroskopie (RKM) untersucht. Beide Materialien zeigen nach der Bestrahlung kleine Hügel (Höhe wenige nm, Radien ca. 10 nm). Da der endliche Krümmungsradius der Sensorspitze die Genauigkeit der RKM sehr empfindlich beeinflußt, steht am Anfang eine quantitative Untersuchung der Abbildungsfehler. Anschließend wird ein Weg zu deren Korrektur aufgezeigt. Die korrigierten Meßwerte ergeben, daß nach Überschreiten eines Schwellenwertes im Energieverlust die Spurhöhen linear und die Durchmesser gemäß einem Potenzgesetz als Funktion des Energieverlusts der Ionen an der Oberfläche ansteigen. Zusätzliche Ausheilungsexperimente legen den Schluß nahe, daß es sich bei den beobachteten Spuren um Metallkolloide handeln könnte. Diese Annahme erlaubt es, eine einfache theoretische Modellierung der Spurgrößen vorzunehmen.

## **Scanning force microscopy of lithium fluoride and calcium fluoride single-crystals after irradiation with heavy ions**

Topic of this thesis are heavy ion induced modifications on the surface of ionic crystals. Single-crystals of LiF and CaF<sub>2</sub> as model systems have been studied with scanning force microscopy (SFM). On both materials, tiny little hillocks are found after irradiation (height few nm, radii ca. 10 nm). The accuracy of SFM is limited by the finite curvature radius of the sensor tip. Therefore, this error source is first analyzed quantitatively, and subsequently a way for correction is presented. The corrected data reveals that above a certain energy loss threshold the heights of the hillocks increase linearly and the radii follow a power law as a function of energy loss at the surface. Additional annealing experiments suggest that the hillocks may consist of metallic colloids. This assumption allows a simple theoretical modellization of the size of the tracks.



"So eine Arbeit wird eigentlich nie fertig, man muß sie für fertig erklären, wenn man nach Zeit und Umständen das möglichste getan hat."

Johann Wolfgang von Goethe (1749-1832)





# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einführung.....</b>	<b>1-1</b>
1.1. Allgemeine Einführung.....	1-1
1.2. LiF und CaF <sub>2</sub> als Modellsysteme.....	1-4
1.2.1. Lithiumfluorid, LiF.....	1-4
1.2.2. Kalziumfluorid, CaF <sub>2</sub> .....	1-7
1.3. Bestrahlungen.....	1-9
<b>2. Rasterkraftmikroskopie (RKM).....</b>	<b>2-1</b>
2.1. Kurze Einführung.....	2-1
2.1.1. Arbeitsprinzip.....	2-1
2.1.2. Meßmodi.....	2-3
Betriebsmodus konstanter Kraft.....	2-3
Kraftmodulation.....	2-8
Tapping <sup>TM</sup> bzw. Semi-Kontakt.....	2-9
2.2. Spitzenartefakte und deren Korrektur.....	2-10
2.2.1. Simulation von RKM.....	2-10
2.2.2. Korrektur von RKM-Bildern.....	2-20
2.2.3. Rekonstruktion der Spitze.....	2-24
2.2.4. Beurteilung des Ergebnisses.....	2-26
2.2.5. Simulationen.....	2-28
2.2.6. Meßbeispiele.....	2-31
<b>3. Messungen.....</b>	<b>3-1</b>
3.1. Verschiedene Methoden der Auswertung.....	3-1
3.1.1. Klassische Auswertung von Hand.....	3-1
3.1.2. Automatisierung.....	3-5

3.1.3. Relative Flächenbedeckung.....	3-11
3.1.4. Vergleich der verschiedenen Methoden.....	3-18
3.1.5. Zu den Fehlern.....	3-22
3.2. Höhen und Radien von Ionenspürhügeln.....	3-24
3.2.1. Rohdaten.....	3-24
3.2.2. Korrektur der Spurradien.....	3-29
3.3. Weitere Eigenschaften der Hügel.....	3-38
3.3.1. Optisches Bleichen.....	3-39
3.3.2. Thermische Ausheilung.....	3-43
3.3.3. Reibung, Kraftmodulation und Semi-Kontakt.....	3-52
 <b>4. Theoretische Betrachtungen.....</b>	 <b>4-1</b>
4.1. Modellierung der Spurgrößen.....	4-1
4.1.1. Ionenspuren in bisher existierenden Modellen.....	4-1
4.1.2. Ein einfacher Modellansatz.....	4-4
Deponierung der Dosis.....	4-4
Einfacher thermodynamischer Ansatz.....	4-13
4.1.3. Vergleich zwischen Theorie und Experiment.....	4-18
 <b>5. Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	 <b>5-1</b>
 <b>6. Referenzen.....</b>	 <b>6-1</b>
 <b>7. Anhang: Zusatz-CD.....</b>	 <b>7-1</b>